

CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO EM AMBIENTE URBANO.

Linha Temática [1]: Recurso Eólico

T. Simões¹A. Estanqueiro²

(1) LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., teresa.simoes@lneg.pt

(2) LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., ana.estanqueiro@lneg.pt

RESUMO

Nas últimas duas décadas, a capacidade eólica instalada no mundo cresceu de forma marcante. O desenvolvimento de projetos de energia eólica onshore e offshore foi recentemente seguida pelo interesse em integrar projetos eólicos em cidades inteligentes. Neste contexto surgiu a necessidade de desenvolver metodologias adequadas e menos onerosas de avaliação do recurso eólico urbano, e de planeamento da integração de turbinas eólicas nestes ambientes. Assim, apresenta-se uma metodologia para a avaliação do recurso eólico urbano baseada na construção de uma superfície de cotas envolvendo o edificado, transformando assim, a área urbana num terreno de orografia muito complexa, e uma metodologia de planeamento da integração de turbinas eólicas em contexto urbano recorrendo a sistemas de informação geográfica. Estas metodologias são validadas com dados experimentais e aplicadas a um caso de estudo.

Palavras chave: Recurso eólico urbano, CFD, Planeamento eólico urbano, SIG.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica urbana tem um grande potencial a ser explorado no contexto de cidades inteligentes, seja através da instalação de pequenas turbinas eólicas no setor doméstico (construção de telhados e áreas circundantes), ou integradas no edifício, desde que estes sejam projetados com o aproveitamento do vento em mente (*Stankovich et al, 2009*). O potencial eólico em áreas urbanas é de difícil caracterização devido ao elevado impacto de obstáculos e estruturas no escoamento atmosférico. Os edifícios causam frequentemente separação do escoamento, redução da velocidade do vento e turbulência elevada no topo e em redor dos edifícios. Além disso, em termos económicos, os custos elevados das campanhas de medição de vento constituem uma barreira importante para o desenvolvimento deste subsector de energia eólica. Outras fontes de dados podem ser utilizadas para a caracterização do fluxo de vento em ambientes urbanos, como bases de dados e atlas nacionais e regionais do potencial eólico. Estas soluções são geralmente baseadas na aplicação de dados de modelos de mesoescala (MM5 – Fifth Generation Mesoscale Model, WRF - Weather Research and Forecasting) em modelos de microescala padrão (por exemplo WASP - Wind Atlas Analysis and Application Program (*Mortensen et.al, 1983*), os quais, não, na maioria dos casos, adequados a estes ambientes. Em ambos os métodos, o potencial eólico é frequentemente sobrestimado (*Simões et al, 2009*), (*Simões, 2015*).

O uso de modelos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para caracterizar o comportamento do vento em torno de edifícios constitui atualmente o estado da arte nesta vertente. No entanto, a aplicação desses modelos é

morosa e complexa, principalmente quando é necessário modelar áreas extensas para avaliar adequadamente o impacto das estruturas no escoamento atmosférico. A complexidade da geometria do domínio requer o uso de computadores potentes para obter resultados fiáveis, tornando difícil e, frequentemente, inexequível, a utilização de modelos CFD no estudo de grandes áreas urbanas. Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia para caracterizar o potencial eólico urbano, com base na construção de uma superfície de cotas envolvendo a área dos edifícios, tratando a área urbana como uma orografia muito complexa – modelo digital de terreno urbano (U-DTM). Esta metodologia considera ainda a aplicação de modelos CFD em pequenas áreas de uma determinada região urbana, possibilitando a determinação de fatores de correção dos mapeamentos preliminares de forma a obter uma descrição do escoamento atmosférico mais precisa em toda a área urbana a estudar. Nos últimos anos, surgiram diversos produtos comerciais no setor da modelação numérica com CFD, sendo alguns deles, especialmente orientados para aplicações de energia eólica urbana. Neste caso particular, o modelo WindSim (WindSim, 2009) (Wallbank, 2008) (referido daqui em diante como CFD-Complex) é utilizado para modelar a superfície dos edifícios e o terreno circundante (U-DTM), e o modelo da Meteodyn (Meteodyn, 2008) (referido daqui em diante como CFD-Urban) é usado para modelar a geometria natural dos edifícios em uma pequena área. Em ambos os casos, são utilizados os dados de vento provenientes do Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental (Costa et al, 2006). Os resultados obtidos por cada modelo são comparados e discutidos neste artigo. É ainda apresentada de forma sintética uma metodologia de planeamento do potencial eólico urbano, tendo em conta os mapeamentos do potencial eólico urbano e utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

2. METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia desenvolvida para a caracterização do recurso eólico em áreas urbanas extensas. Como resultado da aplicação desta, foi ainda efetuado um estudo de avaliação do potencial eólico disponível numa cidade, informação útil para o planeamento de cidades inteligentes e sustentáveis. Assim, apresenta-se igualmente, a metodologia desenvolvida para este efeito.

2.1 Metodologia de avaliação do recurso energético em áreas urbanas extensas

A metodologia proposta baseia-se na geração de um modelo digital de que inclui a orografia do terreno e os edifícios existentes como um todo, representando assim um modelo digital de urbano - U-DTM. Este modelo digital pode ser tratado como um terreno de orografia muito complexa e usado como dado de entrada num modelo padrão de avaliação do recurso eólico (por exemplo, Wasp, WindSim). Essa metodologia reduz fortemente os custos computacionais associados aos modelos CFD padrão, simplifica a geometria da malha urbana e permite estender a área de simulação a uma escala de cidade, o que não acontece nos modelos mais usados para o estudo do escoamento atmosférico nestes ambientes.

O U-DTM é então inserido no modelo CFD-Complex, o qual usando séries sintéticas de dados de vento obtidas por modelação de mesoescala, permite estimar o potencial eólico urbano na ausência de dados experimentais de vento. Devido ao processo de construção do U-DTM, nalgumas regiões, verifica-se uma suavização da geometria dos edifícios. Da mesma forma, sendo os dados de entrada provenientes de modelação de mesoescala, existe quase sempre uma sobrestimativa da velocidade do vento e restantes parâmetros atmosféricos. Neste sentido, é necessário corrigir os mapas de distribuição espacial do recurso eólico, de forma a que estes representem adequadamente o escoamento urbano. Assim, na metodologia proposta, algumas áreas de cidade em estudo, são selecionadas e modeladas no CFD-Urban, onde a geometria precisa dos edifícios é introduzida, para estabelecer fatores de correção da velocidade do vento e do fluxo de potência incidente, os quais são, posteriormente aplicados aos resultados do modelo CFD-Complex, obtidos com o U-DTM. Estes fatores de correção são estabelecidos por comparação dos resultados de ambos os modelos em pontos específicos da cidade. A equação 1 estabelece o método de definição dos fatores de correção (equação 1).

$$FC_i = 1 - \left(\frac{v_{ref_i}}{v_{model_i}} \right) \quad (1)$$

Onde, F_{c_i} é o fator de correção, v_{ref_i} é a velocidade media do vento obtida com o CFD-Urban e v_{model_i} é a velocidade média do vento obtida com o CFD-Complex e o U-DTM para o ponto i .

Dependendo da extensão da área urbana em análise, são definidos fatores de correção para a área em redor dos edifícios (área A) e para os topos dos edifício (Área B), usando o algoritmo descrito em (2).

$$v_i = \begin{cases} F_{c_{ib}} \times v_{model_i} & \text{if } P_i \in \{area B\} \\ F_{c_{ig}} \times v_{model_i} & \text{if } P_i \in \{area A\} \end{cases}; \quad (2)$$

Onde, $F_{c_{ib}}$ é o fator obtido para a área de edificios (topos dos edificios), $F_{c_{ig}}$ é o fator de correção obtido para a área circundante aos edificios e P_i é o ponto de grelha i do mapa de distribuição espacial da velocidade do vento. Para regiões urbanas extensas (por exemplo, área > 5 km²), o detalhe expresso em (2) torna o procedimento mais lento e complexo, pelo que em alternativa poderá ser usado um fator de correção médio, (3).

$$v_i = F_{c_{im}} \times v_{model_i}; \quad (3)$$

Onde, $F_{c_{im}}$ é o fator de correção médio obtido por comparação entre os resultados de ambas as simulações.

A mesma formulação é usada para o cálculo do fluxo de potencia incidente (W/m²). Os fatores de correção são então aplicados ao (s) mapa (s) de recurso eólico obtidos com o U-DTM.

A figura 1, ilustra o procedimento descrito de forma sintética.

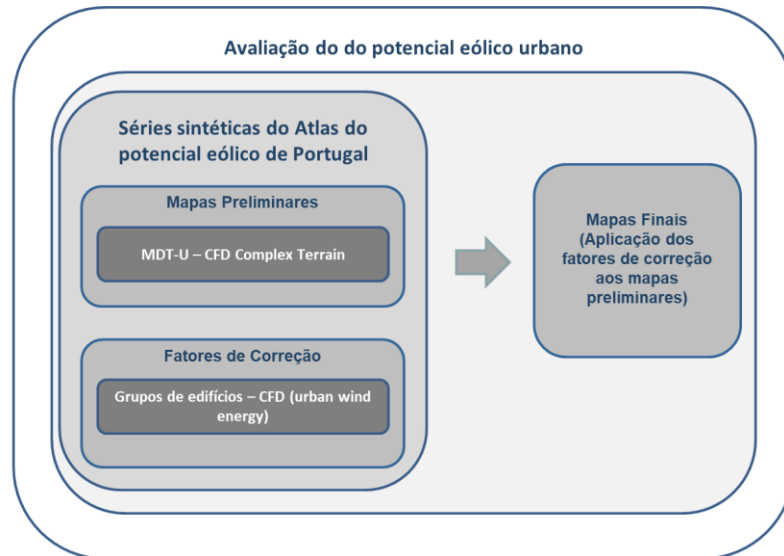


Figura 1.- Método de avaliação do potencial eólico em ambiente urbano.

2.2 Metodologia de identificação do potencial eólico disponível

A identificação do potencial eólico disponível é realizada em duas fases, utilizando os mapeamentos geo-referenciados do recurso eólico (velocidade do vento e fluxo de potencia incidente) e as características geométricas dos edificios. Numa primeira fase, os mapeamentos são inseridos num plataforma SIG e são programadas ferramentas tendo em conta as condições adequadas para a instalação destes sistemas de energia renovável. O resultado deste procedimento é a definição das áreas disponíveis para a instalação de turbinas eólicas para microprodução de energia. Numa segunda fase, é determinada a área ocupada por uma turbina eólica, bem como o espaçamento necessário inter-turbina que minimize os efeitos de esteira.

Na primeira fase, são definidas as condições referentes ao recurso eólico. Este procedimento consiste na imposição de um fator de capacidade mínimo (F_c) (equação 4) que permite a operação eficiente das turbinas eólicas, e na definição de valores mínimos dos restantes parâmetros do recurso eólico - velocidade média do vento e fluxo de potencia incidente – que viabilizem a operação das turbinas. Limites entre 10% e 20% são considerados normais para o parâmetro F_c de pequenas turbinas eólicas. (Trust, 2008).

$$F_c = \frac{NEPs}{8760}; \quad (4)$$

Onde NEPs é o número de horas de produção equivalentes à potencia nominal da turbina eólica. Considerando o valor médio do intervalo de valores de F_c mencionado acima - 15% - o valor de NEPs corresponde a cerca de 1300 h/ano. Embora este parâmetro dependa fortemente da distribuição do vento numa determinada região e da curva de potência da turbina eólica a instalar, pode assumir-se um valor médio da velocidade do vento da ordem de 5 m/s e de 130 W/m² para o fluxo de potência incidente. Estes valores são então introduzidos no SIG para obtenção de um mapeamento que obedeça a estas condições. Para tal é efetuada uma re-classificação do mapa de recurso eólico tendo como base as expressões 5 e 6.

$$\text{If } v_i \geq 5.0 \text{ ms}^{-1}; \text{ then } v_{i,rec} = 1; \text{ else } v_{i,rec} = 0; \quad (5)$$

$$\text{If } FPI_i \geq 130 \text{ Wm}^{-2}; \text{ then } FPI_{i,rec} = 1; \text{ else } FPI_{i,rec} = 0; \quad (6)$$

Onde v_i representa a velocidade média do vento e FPI_i o fluxo de potencia incidente, ambos no ponto i do mapa de recurso energético. $v_{i,rec}$ e $FPI_{i,rec}$ correspondem às mesmas variáveis após a reclassificação.

Os mapas de recurso reclassificados são então multiplicados para obter os pontos do mapa resultantes que obedecem a todas as condições impostas (equação 7). Este mapa final permitirá o cálculo da área disponível para uso no cálculo sustentável do potencial eólico.

$$Pot_{0,1} = v_{i,rec} \times FPI_{i,rec} \quad (7)$$

Onde, $Pot_{0,1}$ corresponde ao mapa resultante “populado” com “0” and “1” (onde “0” corresponda a ponto não adequado e “1” adequado). O passo seguinte passa por estabelecer a área ocupada pela turbina eólica, no mapa de recurso. Esta área é determinada de acordo com o modelo de turbina eólica, em particular, do diâmetro do rotor e da distância inter-turbina. A área mínima ocupada por uma turbina eólica nestas condições, é dada pela expressão 8.

$$A_{min} = (N_1 \times D) \times (N_2 \times D) \quad (8)$$

Onde A_{min} representa a área mínima, D o diâmetro da turbina, e N_1 e N_2 são o número de diâmetros de espaçamento entre turbinas, respetivamente na direção perpendicular e dominante do escoamento atmosférico. No presente trabalho considerou-se $N_1 = 3$ e $N_2 = 8$. O potencial eólico disponível é então determinado com a expressão 9.

$$Pot_{disp} = \frac{A_{tot} \times Pot_{WT}}{A_{min}} \quad (9)$$

Onde Pot_{disp} is é o potencial eólico disponível para instalação na área em estudo (em kW), A_{tot} é a área total ocupada pelos pontos do mapa que obedecem às condições impostas, e Pot_{WT} é a potencia nominal da turbina eólica selecionada para o estudo. A figura 2, ilustra o método descrito.

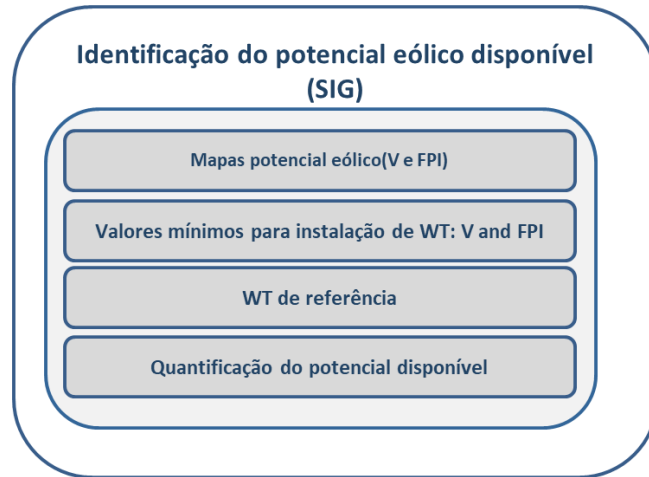


Figura 2.- Método de identificação do potencial eólico disponível.

3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A UM CASO DE ESTUDO

Para testar a metodologia descrita, foram seleccionadas duas áreas urbanas - Estoril e São Domingos de Rana situadas no concelho de Cascais em Portugal. O U-DTM foi gerado numa plataforma SIG com a informação georeferenciada e referente à altimetria do terreno e à malha urbana. A figura 1 representa o U-DTM final (figura 3).

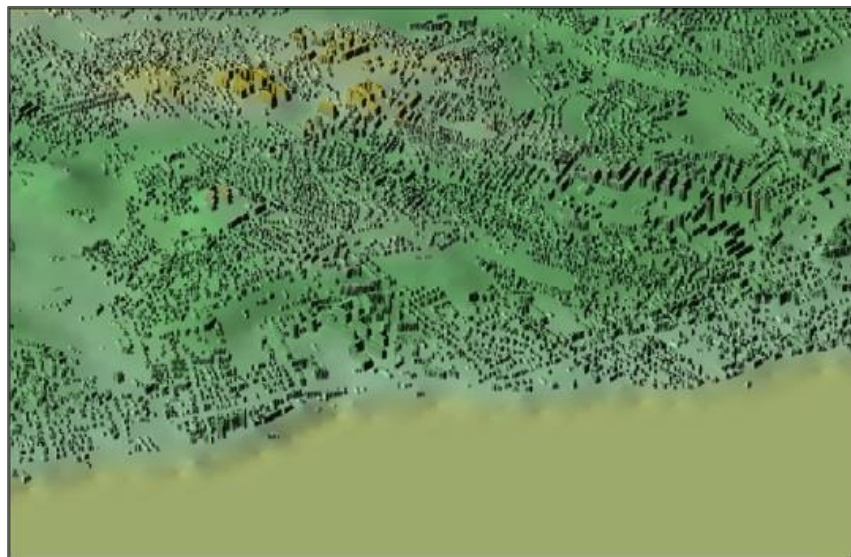


Figura 3.- U-DTM do concelho de Cascais, em Portugal.

O mapeamento do recurso eólico foi obtido com a metodologia descrita no capítulo 2, utilizando os modelos CFD-complex e CFD-Urban. Como dados de vento de entrada, usaram-se séries sintéticas provenientes de modelação de mesoscala. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos parâmetros do vento - velocidade média do vento e fluxo de de potência - para $h = 10\text{m}$ obtidos com o U-DTM antes da definição dos fatores de correção (CFD-Complex), e as figuras 5 e 6 representam as áreas simuladas com o CFD- Urban seleccionadas dentro das zonas urbanas.

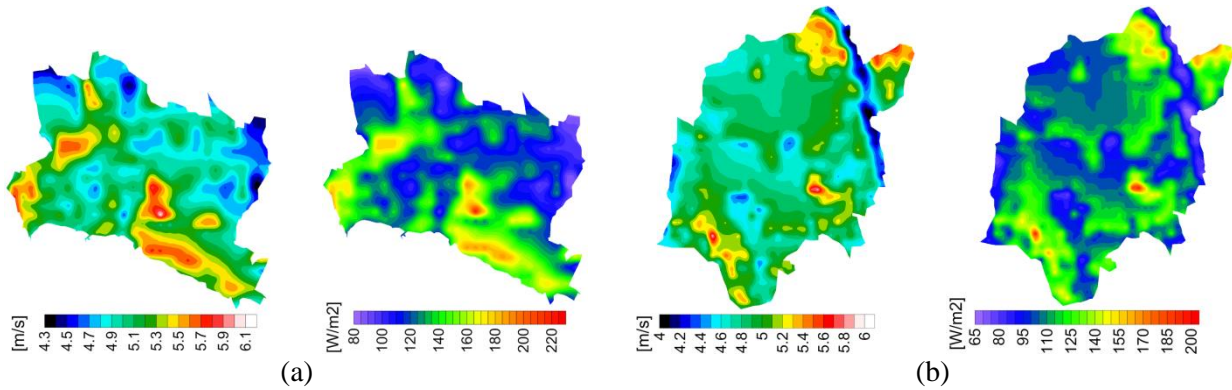


Figura 4.- Mapeamentos de velocidade do vento e fluxo de potencia incidente, obtidos para a) Estoril e b) São Domingos de Rana, como resultado da simulação do U-DTM com o modelo CFD-Complex. ($h=10m$)

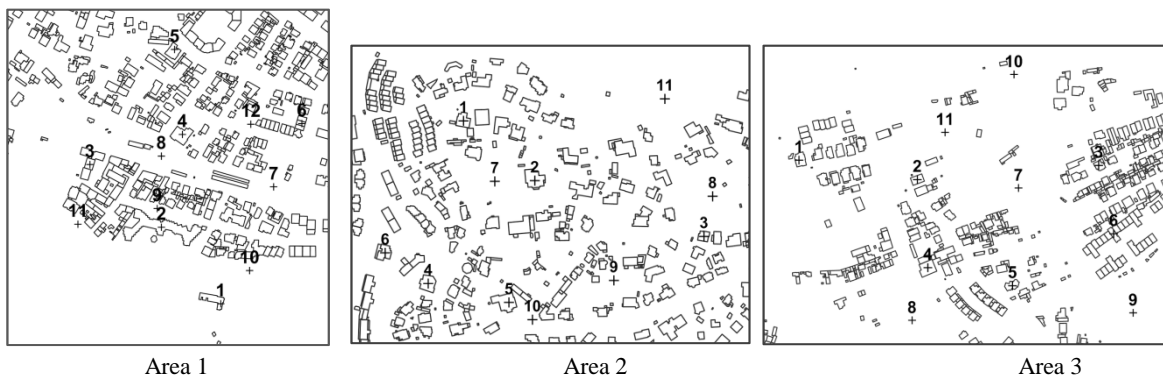


Figura 5.- Áreas seleccionadas na zona urbana de Estoril onde se localizam os pontos de teste.

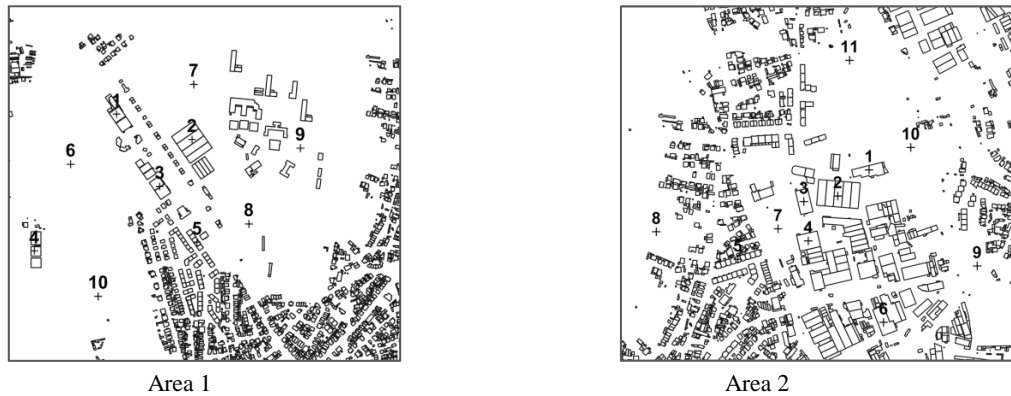


Figura 6.- Áreas seleccionadas na zona urbana de São Domingos de Rana onde se localizam os pontos de teste.

Nas tabelas 1 e 2 podem consultar-se os desvios encontrados entre os resultados de ambas as simulações para os mesmos parâmetros de vento.

Nos pontos situados na cobertura dos edifícios, os desvios são da ordem de 2%. Nas áreas envolventes aos mesmos não construídas, os desvios são superiores, sendo da ordem de 13%. O desvio médio para toda a área é de 6,65%. Deve-se notar que alguns dos locais apresentam desvios maiores do que outros, especialmente em áreas abertas não construídas. Isto deve-se, essencialmente, ao fato de estes se situarem em zonas densamente urbanizadas, menos bem descritas pelo U-DTM, onde a probabilidade de ocorrência de escoamento “deslizante” (*“Skimming flow”*) é superior, i.e., o escoamento passa sobre a camada de edifícios.

Tabela 1.- Comparação de resultados obtidos com ambos os modelos CFD – Velocidade média do vento, (m/s) (h=10m).

ID	ESTORIL						SÃO DOMINGOS			
	Area 1		Area 2		Area 3		Area 1		Area 2	
	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex
1	4.7	5.18	5.03	5.53	5.33	4.95	5.16	4.66	5.06	4.45
2	5.11	5.53	5.11	5.64	5.03	4.97	4.14	4.53	4.61	4.52
3	5.29	5.48	5.24	5.36	5.14	4.89	4.66	4.67	4.23	4.75
4	4.65	5.09	4.6	5.52	4.86	4.96	5.10	4.8	4.51	4.72
5	5.69	5.26	5.23	5.44	5.05	4.95	5.06	4.69	4.67	5.02
6	4.9	5.09	5.71	5.4	5.04	4.93	4.72	4.73	4.81	4.6
7	3.79	5.40	4.13	5.65	4.59	4.93	4.63	4.81	4.64	4.87
8	3.37	5.50	4.35	5.42	4.49	5.08	4.52	4.66	5.09	4.86
9	3.38	5.20	4.1	5.4	4.52	5.01	4.85	4.59	4.98	4.72
10	3.46	5.40	4.51	5.35	4.8	4.84	4.73	4.76	5.07	4.47
11	3.77	5.20	4.88	5.47	4.68	4.91	-	-	5.05	4.82

Para densidade de potência, os desvios são da ordem de -1% nos topos dos edifícios, 23% para as áreas livres de edifícios. O desvio médio corresponde a cerca de 10%.

Tabela 2.- Comparação de resultados obtidos com ambos os modelos CFD – Fluxo de potencia incidente, (W/m2) (h=10m).

ID	ESTORIL						SÃO DOMINGOS			
	Area 1		Area 2		Area 3		Area 1		Area 2	
	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex	CFD-Urban	CFD-Complex
1	102	141	131	167	158	119	133	100	127	84
2	115	169	136	178	129	123	71	91	92	88
3	149	163	149	151	137	115	103	99	74	101
4	98	159	100	165	118	118	131	109	120	99
5	184	145	149	158	132	117	134	102	97	121
6	123	139	190	156	126	118	143	104	106	93
7	53	161	73	178	101	116	133	109	65	109
8	39	165	84	157	91	128	129	99	96	111
9	43	150	73	157	90	124	124	94	85	101
10	44	156	95	150	115	113	148	107	92	87
11	55	145	120	159	106	118	-	-	93	110

Os mapas de distribuição espacial final da velocidade média do vento e do fluxo de potencia incidente foram obtidos após aplicação dos fatores de correção médios à área total em estudo, os quais correspondem a 6,65% para a velocidade média do vento e 10% para o fluxo de potencia incidente (figura 7).

Para validar os resultados obtidos com a metodologia apresentada, instalou-se um sistema LiDAR no telhado de um edifício localizado na vila do Estoril (junho 2012 a maio 2013 com correção interanual da velocidade do vento). Para a região de São Domingos de Rana, recorreu-se a uma estação anemométrica que se encontra em operação na localidade de Tires, desde 2004, tendo-se usado os dados medidos entre 2009 e 2012. Os resultados obtidos com a metodologia descrita foram comparados com as medições nos locais correspondentes aos pontos de medida. No processo de validação, verificou-se que os maiores desvios são da ordem de 11% para a velocidade média do vento (são domingos de Rana) e 21% para a densidade de potencia (Estoril). Já os menores desvios

correspondem a -1% para a velocidade média do vento (Estoril) e -2,5% para a densidade de potencia (São Domingos de Rana).

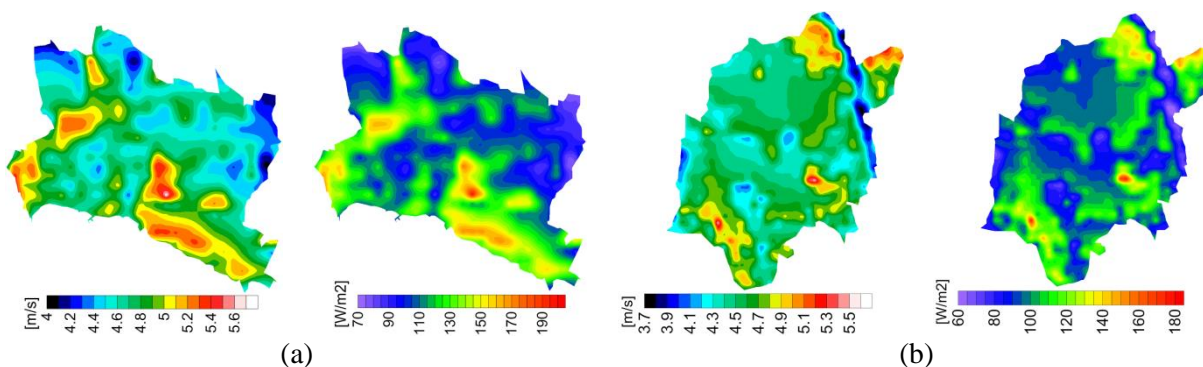


Figura 7.- Mapeamentos finais da velocidade do vento e fluxo de potencia incidente, obtidos para a) Estoril e b) São Domingos de Rana, como resultado da simulação do U-DTM com o modelo CFD-Complex. (h=10m).

Após obtidos os mapeamentos finais do potencial eólico, estes foram introduzidos num SIG onde se desenvolveram as ferramentas adequadas à aplicação da metodologia descrita em 2.2. Para tal seleccionou-se um modelo de turbina eólica com 2.4kW de potencia nominal e D=3.7m. Os resultados apresentam-se na tabela 3 e na figura 8.

Tabela 3.- Potencial disponível nas duas zonas urbanas em análise

REGIÃO	ÁREA TOTAL (m²)	ÁREA DISPONÍVEL (m²)	POTENCIAL EÓLICO DISPONÍVEL (MW)
Estoril	8891376	1607856	11.152
São Domingos de Rana	20442544	540544	3.749

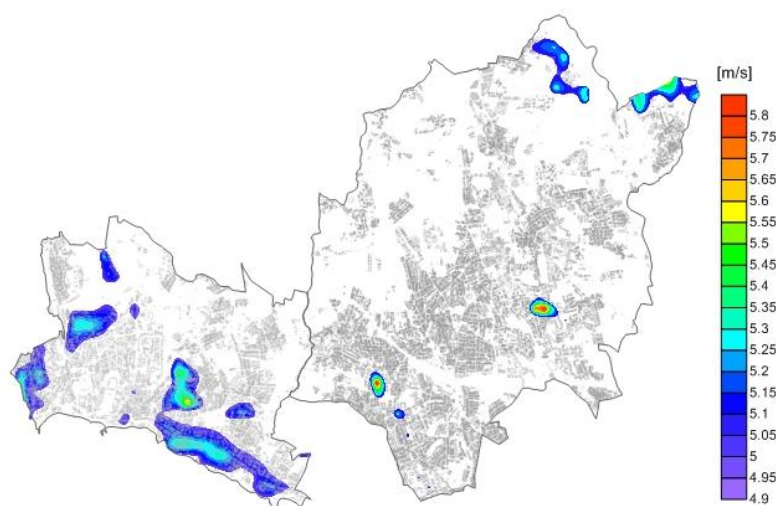


Figura 8.- Áreas adequadas à instalação de pequeaas turbinas eólicas ilustradas com a distribuição espacial da velocidade do vento (m/s)

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para avaliação do recurso eólico urbano baseada na geração de uma superfície de cotas envolvendo a malha urbana e o terreno circundante (U-DTM). Baseia-se em procedimentos simples e de baixo custo que permitem a sua replicação para outras áreas urbanas. Os resultados obtidos foram validados contra dados experimentais, tendo-se obtido desvios aceitáveis comparados com dados provenientes de campanhas experimentais de medição dos parâmetros do vento. O uso da metodologia U-DTM provou ser uma abordagem adequada e interessante para obter o potencial eólico sustentável em áreas urbanas de grandes dimensões (por exemplo, em escala urbana), permitindo a identificação de áreas adequadas para a instalação de pequenas turbinas eólicas. A geração do modelo de terreno digital urbano foi baseada em metodologias bem conhecidas e pode ser realizada facilmente por utilizadores menos experientes. Foi ainda apresentada uma metodologia para planeamento da instalação de pequenas turbinas eólicas em ambiente urbano, a qual foi desenvolvida com base em técnicas de informação geográfica (SIG). Os resultados aqui obtidos são uma contribuição valiosa para a determinação do recurso eólico sustentável em áreas urbanas, e para o planeamento do aproveitamento de renováveis, em varios contextos, com especial relevancia para as cidades inteligentes.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a valiosa contribuição da Câmara Municipal de Cascais a qual disponibilizou a malha urbana e a orografia do concelho de Cascais por intermédio do IGOT – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Costa, P., Miranda, P., & Estanqueiro, A. (2006). *Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas*. 2006 European Wind Energy Conference proceedings. Athens.
- Meteodyn. (2008). *UrbaWind*, version 1.5.0.0, copyright © Meteodyn 2008.
- Mortensen, N. G., Landberg, L., Troen, I., & Petersen, E. L. (1983). *Wind atlas Analysis and Application Program (WASP), Vol. 1: Getting started*. Roskilde: Risoe National Laboratory.
- Simões, T., Costa, P., & Estanqueiro, A. (2009). *A first methodology for wind energy resource assessment in urbanised areas in Portugal*. 2009 European Wind Energy Conference proceedings. Marseille.
- Simões Esteves, T. *Identificação do potencial renovável para a produção de electricidade na perspectiva da microgeração*. Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de Doutor em Energia e Ambiente, especialidade em Energia e Desenvolvimento Sustentável. FCUL, Março 2015.
- Stankovich, S., Campbell, N., & Harries, A. (2009). *Urban Wind Energy*. Earthscan BDSP Partnership Ltd.
- Wallbank, T., 2008. *WindSim Validation Study - CFD validation in complex terrain*. Validation Report. Tønsberg: WindSim AS. pp.1-89.
- WindSim. (2009). *WindSim*, version 4.9.1.24234, copyright © 1997-2009 WindSim AS.
-